

氏名	本多 俊介			
学位の種類	博士 (理学)			
学位記番号	博甲第 8460 号			
学位授与年月日	平成 30年 3月 23日			
学位授与の要件	学位規則第4条第1項該当			
審査研究科	数理物質科学研究科			
学位論文題目	Search for the Higgs Boson Produced in Association with Top Quarks and Decaying into Bottom Quarks with the ATLAS Detector (ATLAS 検出器を用いたトップクォーク・ヒッグス粒子随伴生成の $H \rightarrow b\bar{b}$ 崩壊様式での探索)			
主査	筑波大学教授	博士(理学)	受川 史彦	
副査	筑波大学准教授	理学博士	原 和彦	
副査	筑波大学准教授	理学博士	吉江 友照	
副査	筑波大学准教授	博士(理学)	武内 勇司	

論 文 の 要 旨

本論文は、素粒子標準理論において各粒子に質量を与える役割を担うヒッグス粒子と、物質粒子のひとつであり、標準理論に登場する粒子のなかで最も大きな質量を持つ粒子であるトップ・クォークとの結合(湯川結合)を、欧州 CERN 研究所で遂行中の高エネルギー陽子陽子衝突実験 ATLAS により取得されたデータを解析し、実験的に測定した結果を報告したものである。CERN 研究所の Large Hadron Collider (LHC) 加速器は、2010 年より本格稼働し、ATLAS および CMS の両実験が、2011 年および 2012 年に、重心系衝突エネルギー 7 および 8 TeV での陽子陽子衝突実験を遂行した。2012 年夏には、長年にわたる探索にもかかわらず未確認であったヒッグス粒子と矛盾しない性質を持つ新粒子を発見した。さらに、その性質のより詳細な測定により、この新粒子がある種のヒッグス粒子であることが確定した。翌 2013 年には、同粒子を理論的に予言した2氏がノーベル物理学賞を受賞した。ヒッグス粒子の発見により素粒子標準理論を構成する粒子はすべて実験的に確認されたが、同粒子が、標準理論の予言する唯一無二のヒッグス粒子であるのかどうかは、さらなる検証が必要である。ヒッグス粒子は、弱い相互作用を媒介するゲージ粒子である W ボソン・Z ボソンに、ゲージ対称性をあからさまに破ることなく質量を与えるために導入された。発見に用いられたチャンネルは、これら W ボソン・Z ボソンとの結合を介したものであり、その後、物質粒子のひとつである tau レプトンとの結合が確立された。標準理論における各粒子の質量は自由なパラメータであるものの、トップ・クォークの質量は前述のとおり大きく、理論的に許される上限値に極めて

近い。このことから、トップ・クォークは、粒子質量の起源について何か特別な役割を担っているのではないかと考える研究者も少なからず存在する。したがって、トップ・クォークとヒッグス粒子との結合を直接に測定することは、標準理論の検証として、また、標準理論を超える物理を探るうえで、非常に重要である。

本論文の研究では、陽子陽子衝突においてトップ・クォーク対とヒッグス粒子が随伴して生成される素過程(ttH 過程)を探索し、その断面積を測定した。ヒッグス粒子は、ボトム・クォーク対に崩壊する終状態を用いた。この終状態は、崩壊分岐比が約 60%と大きく、期待される信号数が多いという利点を持つ。一方、背景事象として、強い相互作用によりトップ・クォーク対とボトム・クォーク対が随伴して生成される過程が存在し、これは信号と同じ終状態を与えるため、物理解析においては、その詳細な理解と評価が重要である。本研究では、2015 年と 2016 年に ATLAS 実験により取得された積分輝度 36.07 fb^{-1} 相当の陽子陽子衝突事象を用いて ttH 過程を探索した。陽子陽子の重心系衝突エネルギーは 13 TeV である。トップ・クォークは、ほぼ 100%の分岐比で、ボトム・クォークと W ボソンに崩壊する。W ボソンは、荷電レプトンとニュートリノの対、あるいは軽いクォーク・反クォーク対に崩壊する。本研究では、トップ・クォーク対の終状態として、主に、W ボソンの一方がレプトン対に崩壊し、他方がクォーク・反クォーク対に崩壊する様式を用いた。この終状態は、比較的大きな分岐比と、ある程度高い信号雑音比を持つ。ヒッグス粒子の崩壊に起因するボトム・クォーク対と合わせ、観測される終状態は、荷電レプトン(電子あるいはミュー粒子)、消失横運動量(ニュートリノによる)、ボトム・クォークを起源とするジェット4つ、軽いクォークを起源とするジェット2つ、から成る。高運動量を持つ荷電レプトンの存在を要求して事象をトリガーし、上記の終状態を含む事象を選別した。ボトム・クォークを起源とするジェットは、B 粒子の寿命が長いこと粒子が2次崩壊点において生成されることを利用して、軽いクォークやグルオンを起源とするジェットと識別することが可能である。種々の背景事象を理解するため、ジェットのボトム由来らしさを定量化し、いくつかの閾値をもって事象を分別した。これにより、たとえば、トップ・クォーク対と軽いクォークによるジェットの随伴生成による背景事象を制御することが可能となった。しかしながら、強い相互作用の素過程によるトップ・クォーク対とボトム・クォーク対の随伴生成は、信号と同じ終状態を持つ。よって、単なる事象選別では、分離できない。このため、事象中の様々な情報を利用した多変量解析(Boosted Decision Tree, BDT)を採用し、信号との分離を図った。信号および背景事象のモンテカルロ・シミュレーションを利用し、分離を最適化した。最終的に、BDT 出力の分布をもって、信号強度 μ (生成断面積と崩壊分岐比の積、標準理論の予言値で規格化したもの)を測定した。得られた結果は、 $\mu = 0.84 + 0.64 / -0.61$ であった。期待された精度は、信号強度 1.00 に対して $+0.62 / -0.59$ であり、矛盾しない。ヒッグス粒子の他の崩壊様式の解析と総合すると、信号強度 $\mu = 1.17 + 0.34 / -0.32$ を得た。これを背景事象の統計的揺らぎで説明しようとする、4.2 標準偏差の有意度に対応し(期待値は、3.8 標準偏差)、ttH 過程の証拠を初めて観測する結果となった。

審 査 の 要 旨

[批評]

本論文は、素粒子物理学における現在の最重要課題であるヒッグス粒子について、そのトップ・クォークとの結合を初めて有意な精度で測定したものであり、極めて学術的意義が高い。CERN 研究所の陽子陽子衝突型加速器 LHC を用いた実験は、素粒子実験分野を代表する世界中の研究者が数多く集結して研究を行っており、まさに世界の最先端をゆく研究である。特に、ヒッグス粒子は、その詳細な性質の

測定が素粒子標準理論の検証として重要であり、また、標準理論を超える物理に対する手がかりを与える
と期待されるため、非常に活発な研究が行われている。本論文の研究では、ヒッグス粒子とトップ・クォーク
の結合を初めて直接に測定することに成功した。ヒッグス粒子導入の第一の目的は、ゲージ不変性をあ
からさまに破ることなくゲージ粒子に質量を与えることにある。さもないと、標準理論の基礎である量子場
の理論が破綻する。他方、標準理論においては、同じヒッグス粒子が物質粒子にも質量を与えるという仕
組みになっているが、2012年のヒッグス粒子の発見は、ゲージ粒子への崩壊を観測したものであり、物質
粒子との結合は、その後の研究により τ 粒子について初めて確立された。トップ・クォークは、前述の通り、
すべての素粒子の中で最も大きな質量を持つ粒子であり、そのヒッグス粒子との結合を直接に測定するこ
とは、発見されたヒッグス粒子が標準理論の予言する唯一無二のヒッグス粒子であるか否かを検証するう
えで、決定的な役割を果たす。

本研究では、重心系エネルギー13 TeVの陽子陽子衝突実験においてttH過程の生成断面積の測定
を行うことにより、初めてトップ・クォークとヒッグス粒子の結合を直接に観測することに成功した。著者は、
多変量解析を導入し、信号に対する効率を高く維持しつつ、背景事象との分離を達成することに成功し
た。また、背景事象を十分に理解するために、それぞれの背景過程を制御しやすい領域を設定し、実デ
ータを用いた評価を可能とした。これらにより、先行研究と比較して、最終的に信号に対する感度を40%向
上させること、および生成断面積の測定における背景事象の影響を最小限とすることに成功した。

著者は、注意深く研究を進め、重要な課題を完遂した。研究の詳細は、本論文中に、論理的かつ明解
に述べられている。よって、本論文は、博士論文として十分な学術的価値を持つものと判断される。

〔最終試験結果〕

平成30年2月14日、数理物質科学研究科学学位論文審査委員会において審査委員の全員出席のも
と、著者に論文について説明を求め、関連事項につき質疑応答を行った。その結果、審査委員全員によ
って、合格と判定された。

〔結論〕

上記の論文審査ならびに最終試験の結果に基づき、著者は博士(理学)の学位を受けるに十分な資
格を有するものと認める。